

Політикін М.В.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ТА СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ У СИСТЕМІ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БАГАТОКВАРТИРНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Попри значний потенціал розвитку відновлюваної енергетики, енергетична система України все ще значною мірою залежить від викопного палива, зокрема природного газу, що ускладнює масштабне впровадження сталих джерел енергії в житловому секторі. Особливо актуальним це питання є для населених пунктів, де централізоване теплопостачання або недоступне, або нестабільне, а енергоносії мають високу вартість. У цьому контексті перспективним рішенням є поєднання теплового насоса з сонячною електростанцією як комплексної системи енергозабезпечення, здатної забезпечити опалення та гаряче водопостачання житлових будинків упродовж опалювального періоду. Така система дозволяє скоротити споживання енергії з мережі, підвищити енергоефективність будівлі та сприяти декарбонізації побутового сектору.

У статті представлено математичну модель функціонування інтегрованої системи енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку, яка поєднує тепловий насос та сонячну електростанцію. Актуальність дослідження зумовлена потребою в підвищенні енергоефективності житлового сектору в умовах децентралізації енергетичних систем та зростаючої вартості традиційних енергоносіїв. Метою роботи є дослідження ефективності різних алгоритмів взаємодії між джерелами генерації теплової та електричної енергії з урахуванням добових коливань температури та інсоляції.

У межах дослідження розраховано погодинні значення потужності сонячної генерації, теплових втрат будівлі, потреб у гарячому водопостачанні та електроспоживання теплового насоса. Проведено моделювання функціонування системи за чотирма сценаріями: базовим, реакційним, економним та автономним. Особливу увагу приділено аналізу економного режиму роботи, при якому тепловий насос активується лише за наявності достатнього рівня сонячної генерації.

Результати моделювання показали, що за сприятливих кліматичних умов система може працювати автономно до 10 годин на добу, забезпечуючи потреби в опаленні та гарячій воді без підключення до електромережі. Обсяг електроенергії, спожитої з мережі, істотно знижується, що дозволяє зменшити витрати на енергозабезпечення будинку. Одержані висновки можуть бути використані для попередньої енергетичної оцінки житлових об'єктів, а також при проектуванні систем з відновлюваними джерелами енергії.

Ключові слова: тепловий насос, сонячна електростанція, гібридна енергосистема, енергоефективність, моделювання, опалення, відновлювані джерела енергії, оптимізація енергоспоживання.

Постановка проблеми. У сучасних умовах підвищення цін на енергоносії, енергетичної нестабільності та необхідності зниження викидів парникових газів, актуальним є впровадження відновлюваних джерел енергії у системи теплопостачання житлових будинків [1]. Одним із перспективних рішень є поєднання роботи теплового насоса з фотоелектричною електростанцією, що дозволяє використовувати електроенергію, виро-

блену на місці, для покриття теплових потреб. Проте ефективність такої системи значною мірою залежить від погодних умов, режиму роботи обладнання, а також профілю споживання теплової енергії мешканцями [2, 3].

Недостатня узгодженість роботи теплового насоса з добовими та сезонними коливаннями сонячної генерації може призводити до підвищеного навантаження на електромережу або до

нерационального використання відновлюваної енергії [4]. Це зумовлює необхідність математичного моделювання роботи системи з урахуванням реальних умов експлуатації, що дозволяє оцінити ефективність різних алгоритмів управління та оптимізувати взаємодію елементів. Наразі частка відновлюваних джерел енергії в загальному світовому споживанні становить лише 9% [1]. У країнах з великими запасами викопного палива заміщення традиційних джерел енергії відновлюваними все ще відбувається дуже повільно, проте поступово [5]. Сонячна, вітрова та геотермальна енергія – це три відновлювані джерела енергії, в яких Україна має найбільший потенціал. У ситуації, коли розглядається опалення будівель у найвіддаленіших районах південного сходу країни, де немає газопроводів, оскільки споживачі змушені використовувати нафтопродукти або газові балони, гібридна система, яка поєднує сонячний колектор та геотермальний тепловий насос (ГТН), що є чистим джерелом енергії, є дуже рекомендованим рішенням. Ця система може використовуватися не лише для опалення, але й для гарячого водопостачання (ГВП) у домогосподарствах. Моделювання роботи комбінованої системи типу ГТНП (сонячний тепловий насос на основі ґрунту) у регіоні з високим потенціалом як сонячної, так і геотермальної енергії, є значним кроком уперед у впровадженні відновлюваної енергетики в країні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В огляді літератури з досліджень провідних вчених [3] представлено чудові комбінації сонячних колекторів з тепловими насосами, серед яких є ґрунтові та повітряні джерела. У контексті переходу до відновлюваних джерел енергії та декарбонізації будівельного сектору значну увагу дослідники приділяють комбінованим системам на основі теплових насосів і сонячної генерації. Сян Б. та співавт. провели 10-річне моделювання фотоелектрично-термічної дороги, що асистує ґрунтовому тепловому насосу для опалення будівлі у сервісній зоні автомагістралі [1]. Результати вказують на можливість забезпечення стабільного теплопостачання навіть у періоди пікових навантажень. Маєр Л. та колеги досліджували моделі теплових насосів на основі змішаних цілочисельних підходів для систем предикативного управління в будівлях [2]. Їхній підхід дозволяє оптимізувати роботу системи в умовах мінливих енергетичних потреб. Бірн П. у своєму огляді [3] систематизував сучасні підходи до моделювання теплових насосів, здатних забезпечувати одночасне опалення й охолодження, що є актуальним

для багатофункціональних житлових і комерційних будівель. Есламі С. та співавт. застосували методи геоінформаційного моделювання (GIS) і машинного навчання для планування централізованого теплопостачання із залученням сонячної енергії та теплового насоса на прикладі міста Газіантеп (Туреччина) [4]. Дюмуєн Р., Руніс Е. Д. і Атієнітіс А. моделювали взаємодію будинку з інтегрованою фотоелектрично-термічною системою та повітряним тепловим насосом, звертаючи увагу на інтеграцію з мережею та внутрішній комфорт [5]. Батталья В. з колегами представили динамічну модель геотермального теплового насоса в позитивно-енергетичному будинку, що дозволяє враховувати сезонну акумуляцію та теплову інерцію системи [6]. Чжан С. та співавт. експериментально досліджували поєднану роботу сонячної системи та ґрунтового теплового насоса в односімейному будинку, здійснивши оцінку енергетичних потоків і ККД [7]. Гальяно А., Тіна Д. М. та Анелі С. у своєму дослідженні [8] показали шляхи підвищення енергетичної самодостатності житлових будинків завдяки поєднанню сонячних теплових систем, теплових насосів та систем накопичення енергії. Чжен Ч. зі співавторами проаналізували інтегровану роботу ґрунтового та повітряного теплових насосів з підтримкою від сонячних панелей, провівши техніко-економічну оптимізацію гібридної системи [9]. Хай Т. та колектив авторів провели симуляцію перехідних процесів у системі енергопостачання «розумного» будинку, що працює на сонячній енергії та реверсивному тепловому насосі, з оцінкою економічної ефективності [10]. На думку авторів, типовий термін окупності таких систем становить 3–5 років. Поточну ситуацію з дефіцитом енергії, яку необхідно вирішити, та заклик до зменшення викидів вуглецю в міському житловому секторі також слід зазначити для України. Наприклад, в умовах значно підвищеної потреби в енергонезалежності багатоквартирних будинків, особливо у випадку нестабільного електропостачання, інтеграція теплових насосів із сонячною електростанцією є найкращим та найчистішим рішенням [1]. Оскільки графіки споживання нерівномірні, необхідне балансування навантаження, а також оптимальний розподіл енергії між споживачами, тому багатоквартирні будинки, на відміну від індивідуального сектору, створюють додаткову складність. З огляду на це, постає проблема створення адаптивної моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у багатоквартирному житловому будинку, яка враховує динаміку споживання, кліматичні

умови та технічні параметри обладнання з метою підвищення енергоефективності та енергетичної незалежності системи. актуальною є задача моделювання взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у складі локальної системи енергозабезпечення багатоквартирного будинку [3]. Такий метод дозволяє оцінити енергоефективність, здатність адаптуватися до сезонних кліматичних змін та можливість зменшення споживання енергії з мережі [4].

Постановка завдання. Метою роботи є розробка та аналіз математичної моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції в системі енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку з урахуванням погодинної динаміки навантаження та генерації.

Методика дослідження. У межах даного дослідження було розроблено математичну модель функціонування системи енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку, що поєднує в собі сонячну електростанцію (СЕС) та тепловий насос (ТН). Метою моделювання є аналіз ефективності різних алгоритмів взаємодії елементів системи в умовах змінних кліматичних параметрів, добового споживання теплової енергії та електропостачання [2, 3].

Вибір параметрів моделювання сумісної роботи сонячної електростанції та теплового насоса: Температура зовнішнього повітря та рівень сонячної інсоляції задавалися погодинно для типового зимового дня. Внутрішня температура у приміщенні приймалася постійною: $T_{\text{вн}} = 21^{\circ}\text{C}$. Площа огорожувальних конструкцій та площа сонячних панелей були встановлені як $A_{\text{огр}} = 100\text{ м}^2$ та $A_{\text{pv}} = 20\text{ м}^2$ відповідно. Витрати гарячої води на одну квартиру приймалися з урахуванням нормативних значень та усередненої температури подачі (50°C). з урахуванням поділу на погодинне споживання.

Для обчислення необхідної електричної потужності теплового насоса було досліджено економічний режим – тепловий насос працює лише у години достатньої сонячної генерації [9].

Модель реалізована у середовищі Excel для візуалізації результатів. Вхідні дані задавалися у вигляді масивів погодинних значень, вихідні – у вигляді таблиць та графіків. Згідно математичної моделі визначали кількість годин, упродовж яких система могла працювати автономно. Проводився аналіз співвідношення між генерацією, тепловим навантаженням та електроспоживанням системи.

Алгоритм реалізації моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції в системі

теплопостачання багатоквартирного будинку включав наступні етапи (рис. 1).

Вище представлена схема (рис. 1) демонструє алгоритм моделювання функціонування системи теплопостачання з використанням теплового насоса, генерації електроенергії з допомогою фотоелектричних модулів та різних режимів (алгоритмів) роботи.

Виклад основного матеріалу. У результаті чисельного моделювання було отримано погодинні характеристики роботи інтегрованої системи теплопостачання, що поєднує сонячну електростанцію (СЕС) та тепловий насос (ТН), в умовах типового зимового дня. Аналіз проводився для економічного алгоритму керування, який передбачає активування теплового насоса виключно за наявності достатньої сонячної генерації [1].

Отримані дані охоплюють ключові показники системи: рівень інсоляції, зовнішню температуру, потужність генерації від СЕС, теплові потреби будівлі, необхідну електричну потужність для забезпечення опалення та гарячого водопостачання, а також споживання електроенергії з мережі.

На основі аналізу результатів встановлено, що упродовж близько 10 годин на добу система може працювати автономно, забезпечуючи всі теплові потреби винятково за рахунок сонячної енергії. В інші години, переважно вночі та вранці, частина електричної енергії покривалася за рахунок підключення до мережі. Така динаміка підтверджує ефективність обраного режиму керування в контексті мінімізації витрат на енергоспоживання та використання відновлюваних джерел енергії [1, 7].

Нижче наведена узагальнена математична модель, яка враховує основні блоки:

Потужність генерації електроенергії сонячною електростанцією:

$$P_{\text{pv}}(t) = I(t) \cdot A_{\text{pv}} \cdot \eta_{\text{pv}} \quad (1)$$

де: I – інсоляція [$\text{Вт}/\text{м}^2$]; t – час (в годинах, днях або місяцях); A_{pv} – площа фотомодулів [м^2]; η_{pv} – ефективність фотомодулів.

Потужність теплового насоса:

$$Q_{\text{тепл}}(t) = \text{COP}(T_{\text{вх}}(t)) \cdot P_{\text{ел.насос}}(t) \quad (2)$$

де: $T_{\text{вх}}$ – температура джерела (грунт, повітря і т.п.); $P_{\text{ел.насос}}(t)$ – електроспоживання теплового насоса; $\text{COP}(T_{\text{вх}})$ – коефіцієнт ефективності теплового насоса (залежить від температури).

Розрахунок потреб тепла здійснювали згідно формули (3) [7]:



Рис. 1. Алгоритм реалізації моделі взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції в системі тепlopостачання багатоквартирного будинку

$$Q_{\text{бул}}(t) = Q_{\text{опал}}(t) + Q_{\text{ГВП}}(t) \quad (3)$$

де: $Q_{\text{ГВП}}$ – витрата гарячої води [л/добу];
 $Q_{\text{опал}}(t)$ – потреба на опалення:

$$Q_{\text{опал}}(t) = U \cdot A_{\text{огр}} \cdot (T_{\text{мереж}} - T_{\text{навок}}(t)) \quad (4)$$

$T_{\text{навок}}$ – температура навколишнього середовища [$^{\circ}\text{K}$]

$T_{\text{мереж}}$ – температура мережевої води

$T_{\text{втор}}$ – температура теплоносія вторинного контуру

$$Q_{\text{ГВП}}(t) = c \cdot \rho \cdot Q_{\text{ГВП}} \cdot (T_{\text{ГВП}} - T_{\text{вх}}) \quad (5)$$

Режими роботи (алгоритми):

Базовий: тепловий насос працює стабільно для покриття всієї потреби.

Реакційний: насос вмикається/вимикається в залежності від дефіциту тепла [9].

Економний: використовує лише надлишкову PV-енергію.

Автономний: PV + акумулятор, незалежна система.

Енергоспоживання теплового насоса кожному режимі розраховується за формулою (6):

$$P_{\text{ел.викор}}(t) = \max(P_{\text{ел.насос}}(t) - P_{\text{PV}}(t), 0) \quad (6)$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$C = \int_{t_0}^{t_f} P_{\text{ел.викор}}(t) \cdot c_{\text{ел}}(t) dt \quad (7)$$

де $c_{\text{ел}}(t)$ – тариф на електроенергію.

Нижче подано приклад реалізації математичної моделі для «економного алгоритму» функціонування системи тепlopостачання, де теплова енергія подається тільки в ті години, коли доступна достатня кількість електроенергії з фотоелектричних панелей.

Витрата ГВП: $\dot{V}_{\text{ГВП}} = 0,1$ м³/добу

$$T_{\text{внутр}} = 21^{\circ}\text{C}, T_{\text{вх}} = 10^{\circ}\text{C}, T_{\text{ГВП}} = 50^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

Розрахунок по годинах дня: $t = 1, \dots, 24$

Енерготариф: $c_{\text{ел}} = 4,32$ грн/кВт·год

Алгоритм «економного режиму»

Використовуємо тільки сонячну енергію – насос працює за умови, коли $P_{\text{PV}}(t) \geq P_{\text{ел}}(t)$

Якщо не вистачає – тепlopостачання не відбувається

У цьому режимі:

$$P_{\text{мереж}}(t) = 0 \Rightarrow C = 0 \quad (9)$$

Нижче подано приклад реалізації математичної моделі для «економного алгоритму» функціонування системи опалення, де теплова енергія подається тільки в ті години, коли доступна достатня

кількість електроенергії з фотоелектричних панелей [10].

Вихідні умови для розрахунку математичної моделі були наступні:

Площа панелей: $A_{\text{PV}} = 20$ м²

Ефективність панелей: $\eta_{\text{PV}} = 0,18$

Питомі значення:

$c = 4,18 \cdot 10^3$ Дж/(кг·°K)

$\rho = 1000$ кг/м³

$U = 0,5$ Вт/м²·K

$A_{\text{огр}} = 100$ м²

$COP = 3,0$ (припустимо сталою для спрощення)

Витрата ГВП: $\dot{V}_{\text{ГВП}} = 0,1$ м³/добу

$T_{\text{внутр}} = 21^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{вх}} = 10^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ГВП}} = 50^{\circ}\text{C}$

Розрахунок по годинах дня: $t = 1, \dots, 24$

Енерготариф: $c_{\text{ел}} = 4,32$ грн/кВт·год

Алгоритм «економного режиму»

В розрахунку математичної моделі згідно економного режиму розглядали використання тільки сонячної енергії – насос працює ТІЛЬКИ коли $P_{\text{PV}}(t) \geq P_{\text{ел}}(t)$

Якщо не вистачає потужності – тепlopостачання не відбувається

1. Генерація сонячної електроенергії:

$$P_{\text{PV}}(t) = I(t) \cdot A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad (10)$$

2. Потреба в теплі:

$$Q_{\text{опал}}(t) = U \cdot A_{\text{огр}} \cdot (T_{\text{внутр}} - T_{\text{навок}}(t)) \quad (11)$$

$$Q_{\text{ГВП}} = c \cdot \rho \cdot \dot{V}_{\text{ГВП}} \cdot (T_{\text{ГВП}} - T_{\text{вх}}) / 24 \quad (12)$$

3. Електроспоживання теплового насоса:

$$P_{\text{ел}}(t) = \frac{Q_{\text{опал}}(t) + Q_{\text{ГВП}}}{COP} \quad (13)$$

4. Умова запуску:

Якщо $P_{\text{PV}}(t) \geq P_{\text{ел}}(t) \Rightarrow$ виконується опалення, інакше ні.

5. Вартість електроенергії:

Гранична умова економного режиму:

$$P_{\text{мереж}}(t) = 0 \Rightarrow C = 0 \quad (14)$$

Умови тепlopостачання виконуються тільки тоді, коли генерація сонячної електроенергії $P_{\text{PV}} \geq$ потрібної потужності теплового насоса $P_{\text{ел}}$.

Години 6–23 (6:00–23:00) – тепlopостачання відбувається частково або повністю за рахунок сонячної енергії.

Вартість електроенергії з мережі значна тільки вночі та на світанку. В табл. 1. Подано результати обчислення згідно математичної моделі.

Табл. 1 охоплює добовий цикл із погодинним урахуванням температури зовнішнього повітря,

Погодинні результати моделювання взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у системі енергозабезпечення багатоквартирного житлового будинку в економному режимі

T, год	T _{зовн} , °C	I, Вт/м ²	P _{pv} , кВт	Q _{опал} , Вт	Q _{заг} , Вт	Q _{ГВП} , кВт	Нагрів	P, кВт
0	-5	0	0	1300	1493,51	0,49784	-	0,49
1	-6	0	0	1350	1543,51	0,51450	-	0,51
2	-7	0	0	1400	1593,51	0,53117	-	0,53
3	-8	0	0	1450	1643,51	0,54784	-	0,54
4	-7	10	0,036	1400	1593,51	0,53117	-	0,49
5	-5	50	0,18	1300	1493,51	0,49784	-	0,31
6	-3	150	0,54	1200	1393,51	0,46450	+	0
7	0	300	1,08	1050	1243,51	0,41450	+	0
8	2	500	1,8	950	1143,51	0,38117	+	0
9	4	600	2,16	850	1043,51	0,34784	+	0
10	5	700	2,52	800	993,518	0,33117	+	0
11	6	800	2,88	750	943,518	0,31450	+	0
12	5	750	2,7	800	993,518	0,33117	+	0
13	4	650	2,34	850	1043,51	0,34784	+	0
14	3	500	1,8	900	1093,51	0,36450	+	0
15	2	300	1,08	950	1143,51	0,38117	+	0
16	1	100	0,36	1000	1193,51	0,39784	-	0,037
17	0	50	0,18	1050	1243,51	0,41450	-	0,234
18	-1	10	0,036	1100	1293,51	0,43117	-	0,395
19	-2	0	0	1150	1343,51	0,44784	-	0,447
20	-3	0	0	1200	1393,51	0,46450	-	0,464
21	-4	0	0	1250	1443,51	0,48117	-	0,481
22	-5	0	0	1300	1493,51	0,49784	-	0,497
23	-6	0	0	1350	1543,51	0,51450	-	0,514

сонячного випромінювання та теплових потреб житлового будинку. Визначено, що:

У темний період доби (0:00–5:00, 16:00–23:00) тепловий насос не може працювати автономно через відсутність генерації сонячної електроенергії. Потреби в теплі покриваються частково або повністю за рахунок електроенергії з мережі (до 0,54 кВт у години з найнижчими температурами).

У денний період (6:00–15:00) генерація від фотоелектричних панелей поступово зростає й досягає максимуму близько 11–13 годин (2,88 кВт при інсоляції 800 Вт/м²). У цей період тепловий насос працює виключно за рахунок сонячної генерації, повністю покриваючи теплові потреби.

В середньому протягом 10 годин на добу система функціонує автономно, без використання електроенергії з мережі, що демонструє високий потенціал впровадження гібридної схеми у багатоквартирних житлових будинках [1].

Графічне зображення режимів роботи системи згідно математичної моделі представлено на рис. 2.

Розроблена модель підтверджує ефективність застосування економного алгоритму керування теплопостачанням, що дозволяє мінімізувати витрати на електроенергію за рахунок адаптивної роботи теплового насоса у синхронізації з генерацією сонячної електростанції.

Висновки. У результаті проведеного енергетичного моделювання взаємодії сонячної електростанції та теплового насоса в системі забезпечення потреб багатоквартирного житлового будинку сформульовано узагальнені положення щодо ефективності поєднання відновлюваних джерел енергії та інтелектуальних систем керування. Побудована математична модель дозволяє враховувати погодинні зміни зовнішніх кліматичних умов, добові коливання навантажень на системи опалення й гарячого водопостачання, а також динаміку електричної генерації фотоелектричної установки. Модель демонструє гнучкість щодо вибору сценаріїв керування (базовий, реакційний, економний, автономний), що дозволяє адаптувати систему до різних технічних, кліматичних та економічних умов.

Застосування економного алгоритму керування забезпечує автономну роботу системи упродовж

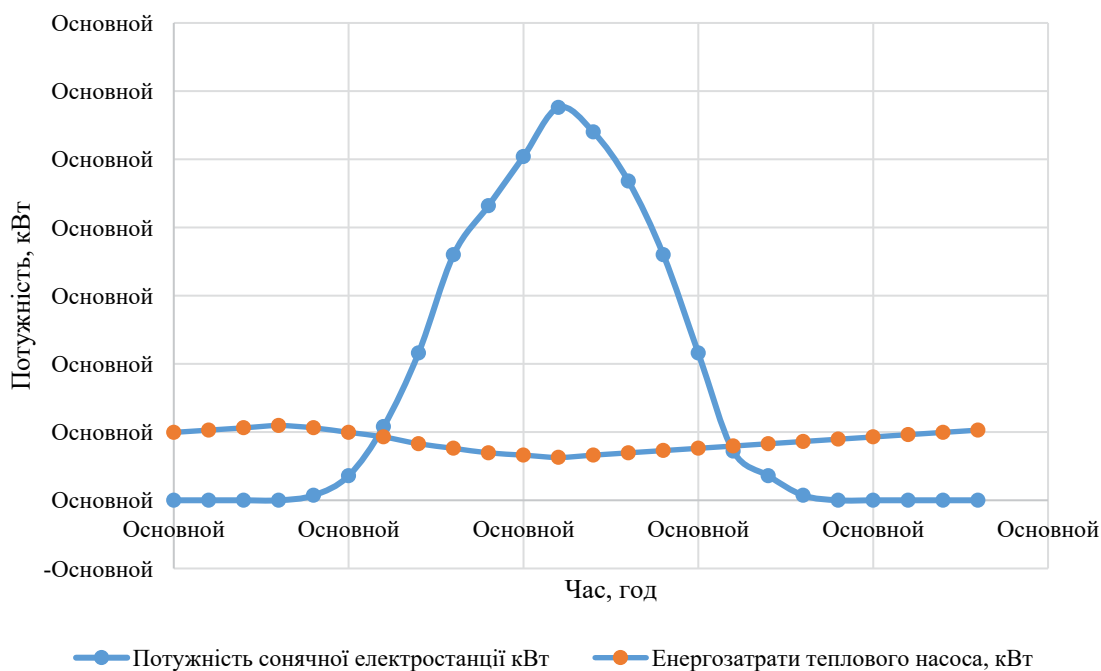


Рис. 2. Моделювання взаємодії теплового насоса та сонячної електростанції у складі локальної системи енергозабезпечення багатоквартирного будинку

щонайменше 10 годин на добу в умовах типового зимового дня, що дозволяє значно зменшити залежність від централізованого електропостачання. Ефективна взаємодія теплового насоса та сонячної електростанції сприяє зниженню загального енергоспоживання з мережі, зменшенню експлуатаційних витрат та обсягів викидів CO₂. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження гібридних енергетичних систем у житловому секторі як одного з напрямів забезпечення енергоефективності та екологічної сталості.

Разом з тим, дослідження має узагальнений характер. Його результати є концептуальною основою для подальшої прикладної роботи, що передбачає обрання типового багатоквартирного житлового будинку, складання цифрового двійника системи енергозабезпечення та верифікацію математичної моделі за експериментальними

даними. У процесі розробки цифрового двійника планується відокремити дві підсистеми: моделювання генерації та споживання електричної енергії для загальнобудинкових потреб (ліфти, насоси, освітлення), а також моделювання теплового насоса як споживача електроенергії від СЕС і мережі та, одночасно, джерела теплової енергії для системи опалення та гарячого водопостачання. Очікуваним результатом подальших досліджень стане методика оптимізації потужності теплового насоса, вибору об'ємів теплоаккумуляторів та аккумуляторів електроенергії залежно від кількості мешканців та характеристик будівлі.

Отримані результати можуть бути використані для попередньої оцінки ефективності впровадження гібридних енергосистем у житлових будівлях та для прийняття обґрунтованих рішень щодо енергетичної модернізації будинків.

Список літератури:

1. 10-year simulation of photovoltaic-thermal road assisted ground source heat pump system for accommodation building heating in expressway service area / B. Xiang et al. *Solar Energy*. 2021. Vol. 215. P. 459–472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.12.056> (date of access: 24.06.2025).
2. Assessing mixed-integer-based heat pump modeling approaches for model predictive control applications in buildings / L. Maier et al. *Applied energy*. 2022. Vol. 326. P. 119894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119894> (date of access: 24.06.2025).
3. Byrne P. Research summary and literature review on modelling and simulation of heat pumps for simultaneous heating and cooling for buildings. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 10. P. 3529. URL: <https://doi.org/10.3390/en15103529> (date of access: 24.06.2025).

4. District heating planning with focus on solar energy and heat pump using GIS and the supervised learning method: Case study of Gaziantep, Turkey / S. Eslami et al. *Energy conversion and management*. 2022. Vol. 269. P. 116131. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116131> (date of access: 24.06.2025).
5. Dumoulin R., Rounis E. D., Athienitis A. Operation and grid interaction modeling of a house with a building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) system coupled to an air-source heat pump. *Science and technology for the built environment*. 2021. Vol. 27, № 9. P. 1311–1329. URL: <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1941247> (date of access: 24.06.2025).
6. Dynamic modelling of geothermal heat pump system coupled with positive-energy building / V. Battaglia et al. *Energy*. 2023. Vol. 284. P. 128557. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128557> (date of access: 24.06.2025).
7. Experimental investigation on a combined solar and ground source heat pump system for a single-family house: energy flow analysis and performance assessment / C. Zhang et al. *Energy and buildings*. 2021. Vol. 241. P. 110958. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110958> (date of access: 24.06.2025).
8. Gagliano A., Tina G. M., Aneli S. Improvement in energy self-sufficiency in residential buildings using photovoltaic thermal plants, heat pumps, and electrical and thermal storage. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 5. P. 1159. URL: <https://doi.org/10.3390/en18051159> (date of access: 24.06.2025).
9. Integrated operation of PV assisted ground source heat pump and air source heat pump system: performance analysis and economic optimization / Z. Zheng et al. *Energy conversion and management*. 2022. Vol. 269. P. 116091. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116091> (date of access: 24.06.2025).
10. Transient performance simulation and technoeconomic assessment of a smart building energy plant driven by solar energy coupled to a reversible heat pump / T. Hai et al. *Journal of cleaner production*. 2023. Vol. 405. P. 136946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136946> (date of access: 24.06.2025).

Politykin M.V. MODELING THE INTERACTION OF A HEAT PUMP AND A SOLAR POWER PLANT IN THE ENERGY SUPPLY SYSTEM OF AN APARTMENT BUILDING

The purpose of this study is to investigate the adsorption of glyphosate by carbon sorbents, particularly multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), to establish optimal conditions and parameters for the effective removal of this pesticide from water sources. The research involved the use of Multi-walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) with a diameter of 5–15 nm. The study examined the impact of physicochemical properties of sorbents, temperature, and glyphosate concentration on the adsorption process. Methods were developed to assess the adsorption characteristics of carbon nanotubes. Kinetic and thermodynamic analyses were carried out to elucidate the mechanism of adsorption. Experimental output curves were obtained at +20 (±0.5) °K, and for zeolite particles with a diameter of 1 mm, the effective internal diffusion coefficient was determined to be $2.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

The study found that carbon sorbents, including MWCNTs, exhibit high efficiency in removing glyphosate from aqueous environments. The results highlight the importance of adsorption parameters and sorbent properties in optimizing glyphosate removal. Kinetic and thermodynamic evaluations provided a deeper understanding of the adsorption process. This research provides a novel analysis of glyphosate removal using carbon nanomaterials and presents newly developed methods for evaluating their adsorption properties. It also includes detailed thermodynamic and kinetic assessments, which are not commonly addressed in conventional studies on pesticide adsorption.

The findings can support the development of effective water purification systems using carbon sorbents to reduce pesticide contamination. The study offers insight into the duration and source identification of glyphosate pollution, contributing to environmental monitoring and mitigation efforts. Carbon-based sorbents, particularly MWCNTs, have high potential for practical application in water treatment systems aimed at removing glyphosate. Understanding their adsorption behavior, influenced by physicochemical and environmental factors, enables the development of efficient methods for protecting water resources and the broader ecosystem.

Key words: heat pump, solar power plant, hybrid power system, energy efficiency, modeling, heating, renewable energy sources, energy consumption optimization.

Дата надходження статті: 14.07.2025

Дата прийняття статті: 21.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025